

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

Томск
Издательский Дом ТГУ
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/399

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА CoCrFeNiMn-0.9%C

Шайсултанов Д.Г., Степанов Н.Д., Высоцкий И.В., Жеребцов С.В.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород

В последнее время значительное внимание исследователей привлекают многокомпонентные сплавы приблизительно эквиатомных композиций, получившие устойчивое название высокоэнтропийных сплавов (ВЭСов). Согласно оригинальному определению, ВЭСы – это сплавы, которые содержат 5 и более элементов в эквимольных концентрациях с содержанием каждого элемента от 5 до 35 ат.% [1]. Многочисленные исследования продемонстрировали, что ВЭСы могут обладать рядом привлекательных свойств, включающих в себя высокую твердость, износостойкость, коррозионную стойкость, хорошим сочетанием прочности и пластичности при комнатной температуре, высокой прочностью при повышенных температурах [2–10].

На сегодняшний день одним из хорошо изученных сплавов является эквиатомный сплав CoCrFeNiMn, имеющий однофазную структуру твердого раствора с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой. Сплав демонстрирует высокую пластичность при комнатной температуре и удивительно высокие прочностные и пластические свойства при криогенных температурах – предел текучести и пластичность в 2 раза выше, чем при комнатной температуре [2,3]. Известно, что свойства сплава могут быть улучшены как за счет термомеханической обработки [11], так и за счет дополнительного легирования [11–13] В качестве потенциального легирующего элемента особое внимание привлекает такой элемент внедрения как углерод [11,12], поскольку приводит к значительному упрочнению твердого раствора и может использоваться для изменения механизма деформации из-за сильного влияния на энергию дефекта упаковки ГЦК матрицы [11].

Между тем, высокий уровень механических свойств не является единственной и важной характеристикой для возможного применения любого конструкционного материала. Возможность применения в ВЭСах такого технологического процесса как сварка, также имеет важное значение. Одним из универсальных технологий, имеющих большие перспективы в различных отраслях производства, является сварка трением с перемешиванием (СТП). СТП показала высокую эффективность для создания высококачественных и высокопрочных неразъемных соединений различной геометрии из стали, алюминиевых, медных, титановых и жаропрочных сплавов. Использование такого метода получения сварных соединений из ВЭСов может позволить существенно расширить области их применения. Однако отсутствие информации о влиянии сварки трением с перемешиванием на микроструктуру и механические свойства сварных швов из ВЭСов затрудняет разработку режимов сварки для получения высокопрочных и высококачественных соединений.

В данной работе был использован сплав CoCrFeNiMn–0,9%C (ат.%), полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В качестве исходного материала использовалась смесь порошков: оксиды из выбранных элементов (NiO, Cr₂O₃, Co₃O₄, Fe₂O₃, MnO₂), чистый углерод (C) и Al, необходимый для воспламенения. Перед сваркой трением с перемешиванием литой сплав подвергался холодной прокатке до 80% и отжигу при 900°C в течение 1 часа для получения однородной, мелкозернистой структуры. Структура сплава после отжига состояла из рекристаллизованной ГЦК-матрицы со средним размером зерна 9,2 мкм и мелких карбидов типа M₂₃C₆ объемной долей 2%. Сварка осуществлялась на воздухе с использованием инструмента на основе WC-Co. Скорость перемещения инструмента соответствовало 100 мм/мин, а частота вращения - 600 об/мин, 800 об/мин и 1000 об/мин. Полученные сварные соединения не имели видимых дефектов. Микроструктура сплава после СТП состояла из относительно равноосных зерен. Установлено, что увеличение частоты оборотов от 600 об/мин до 1000 об/мин приводило к росту среднего

Секция 8. Сварка, родственные процессы и технологии для создания технических систем ответственного и специального назначения, в том числе для эксплуатации в экстремальных условиях и низких климатических температур Арктики и Крайнего Севера

размера зерна в зоне перемешивания (ЗП) от $3,2 \pm 0,7$ мкм до $4,6 \pm 2,4$ мкм, соответственно. Во всех состояниях в ЗП, подобно зоне основного материала (ОМ), находились частицы карбидов типа $M_{23}C_6$. При 1000 об/мин объемная доля карбидов составила $\sim 7\%$.

Механические свойства сварных соединений оценивались по результатам измерения микротвёрдости и испытаний на растяжение. Показано, что во всех состояниях ЗП демонстрирует высокую твердость по сравнению с основным материалом. Так, максимальное значение твердости в зоне шва составило 260 HV (600 об/мин), а в основном материале – 180HV. Вероятно, повышение твердости связано с уменьшением размера зерна в зоне сварки в соответствии с механизмом Холла-Петча. Результаты испытаний на растяжение поперечных образцов после СТП показали довольно близкие значения предела прочности с основным материалом ($\sigma_B = 683$ МПа - ОМ и $\sigma_B = 690-698$ МПа после СТП), но разные значения относительного удлинения - 70% и $\sim 30\%$, соответственно. Максимальные прочностные свойства в продольном направлении наблюдаются при сварке 600 об/мин. Так, $\sigma_{0,2}$ и σ_B равны 644 МПа и 790 МПа, соответственно, а $\delta = 21\%$. Повышение частоты до 800 об/мин ведет к снижению предела текучести (552 МПа) и предела прочности (756 МПа), а также повышению пластичности (30%). При частоте 1000 об/мин пластичность возрастает до 60%, а прочностные свойства снижаются до значений 440 МПа ($\sigma_{0,2}$) и 723 МПа (σ_B). Изменение прочностных и пластических свойств коррелирует с изменением размера зерен, зависимости от доли частиц карбидов не наблюдается.

1. Yeh J.-W. Recent Progress in High-Entropy Alloys // *Ann. Chim.* 2006. Vol. 31. P. 633–648.
2. Cantor B. et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Mater. Sci. Eng. A*. 2004. Vol. 375–377, № 1-2 SPEC. ISS. P. 213–218.
3. Otto F. et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Mater.* 2013. Vol. 61, № 15. P. 5743–5755.
4. Stepanov N.D. et al. Structure and mechanical properties of a light-weight AlNbTiV high entropy alloy // *Mater. Lett. Elsevier*, 2015. Vol. 142. P. 153–155.
5. Senkov O.N. et al. Oxidation behavior of a refractory NbCrMo0.5Ta0.5TiZr alloy // *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47, № 18. P. 6522–6534.
6. Senkov O.N. et al. Refractory high-entropy alloys // *Intermetallics*. Elsevier Ltd, 2010. Vol. 18, № 9. P. 1758–1765.
7. Senkov O.N. et al. Development of a refractory high entropy superalloy // *Entropy*. 2016. Vol. 18, № 3. P. 1–13.
8. Senkov O.N. et al. Mechanical properties of Nb25Mo25Ta25W25 and V20Nb20Mo20Ta20W20 refractory high entropy alloys // *Intermetallics*. Elsevier Ltd, 2011. Vol. 19, № 5. P. 698–706.
9. Wu Z. et al. Recovery, recrystallization, grain growth and phase stability of a family of FCC-structured multi-component equiatomic solid solution alloys // *Intermetallics*. 2014. Vol. 46. P. 131–140.
10. Wu Y.D. et al. Phase composition and solid solution strengthening effect in TiZrNbMoV high-entropy alloys // *Mater. Des.* 2015. Vol. 83. P. 651–660.
11. Stepanov N.D. et al. Effect of thermomechanical processing on microstructure and mechanical properties of the carbon-containing CoCrFeNiMn high entropy alloy // *J. Alloys Compd.* Elsevier B.V, 2017. Vol. 693. P. 394–405.
12. Stepanov N.D. et al. Effect of carbon content and annealing on structure and hardness of the CoCrFeNiMn-based high entropy alloys // *J. Alloys Compd.* 2016. Vol. 687, № September. P. 59–71.
13. Stepanov N.D. et al. Effect of Al on structure and mechanical properties of Fe-Mn-Cr-Ni-Al non-equiatomic high entropy alloys with high Fe content // *J. Alloys Compd.* Elsevier B.V, 2019. Vol. 770. P. 194–203.